จำนวนประชากรที่เหมาะสมของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมขนาดเล็กสำหรับประเมินความแข็งแรงในที่ของชั้นพื้นทางดินซีเมนต์

AN APPROPRIATE POPULATION OF MICRO GENETIC ALGORITHMS FOR EVALUATION OF IN SITU STIFFNESS OF SOIL-CEMENT BASE

พุทธพล ทองอินทร์ดำ[1] และ ประกาศ ทองประไพ[2]
[1]หัวหน้าศูนย์ความเป็นเลิศด้านโครงสร้างพื้นฐานและเทคโนโลยีท่าอากาศยาน (CEIA) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 39 หมู่ 1 ถ.รังสิต-นครนายก ต.คลองหก อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12110, puttapon.t@en.rmutt.ac.th
[2]กรรมการศูนย์ความเป็นเลิศด้านโครงสร้างพื้นฐานและเทคโนโลยีท่าอากาศยาน (CEIA) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 39 หมู่ 1 ถ.รังสิต-นครนายก ต.คลองหก อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12110, prakard.t@en.rmutt.ac.th

Puttapon Thongindam [1] and Prakard Thongprapai [2]
[1]Head of Center of Excellence for Infrastructure and Airport Technology (CEIA), Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, 39 M.1 Rangsit-Nakorn Nayok Road, Klong 6, Klong Luang, Pathumthani, 12110, puttapon.t@en.rmutt.ac.th
[2]Committee of Center of Excellence for Infrastructure and Airport Technology (CEIA), Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, 39 M.1 Rangsit-Nakorn Nayok Road, Klong 6, Klong Luang, Pathumthani, 12110, prakard.t@en.rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการศึกษาประสิทธิภาพการวิเคราะห์ย้อนกลับหาค่าความแข็งแรงของโครงสร้างถนนที่ใช้พื้นทางดินซีเมนต์ด้วยระเบียบวิธีขั้นตอนเชิงพันธุกรรมขนาดเล็ก โดยเก็บข้อมูลภาคสนามจากแปลงทดสอบที่สร้างขึ้นในจังหวัดฉะเชิงเทรา โดยทดลองกำหนดจำนวนประชากรแบบอย่างง่ายที่แปรผันตามความยาวของสายอักขระ พบว่าการวิเคราะห์ด้วยจำนวนประชากรขนาดใหญ่กว่าด้วยระยะเวลานานกว่ามีแนวโน้มให้ค่าคำตอบที่มีความถูกต้องสูงกว่า แต่มีข้อด้อยที่ใช้ระยะเวลานาน รวมทั้งการวิเคราะห์ช่วงประมาณ 10,000 ครั้งสุดท้ายอาจไม่คุ้มค่ากับผลลัพธ์ที่ได้ ในขณะที่กระบวนการวิเคราะห์ที่มีจำนวนรอบจำกัดให้ค่าความถูกต้องในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ โดยผลการศึกษาพบว่าจำนวนประชากรต่อรุ่นเท่ากับ 7 ทำให้ระเบียบวิธีขั้นตอนเชิงพันธุกรรมขนาดเล็กสามารถทำงานได้ประสิทธิภาพสูงสุดในกรณีศึกษานี้

คำสำคัญ: พื้นทางดินซีเมนต์, โมดูลัสยืดหยุ่น, ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมขนาดเล็ก

ABSTRACT

This article presents the results of a study on the efficiency of backanalysis for the strength of road structure containing soil-cement base using micro-genetic algorithms. Field data are collected from the test sections constructed in Chachoengsao Province. The population sizing is determined by the simplified approach depending on the string length. It has been found that large population with generous computational resources results in higher accuracy. But the disadvantages are that it takes longer time and the approximate last 10,000 function evaluations may not be worth the added computation cost. While large population with limited computational resources is appropriate for practical application and the accuracy is within acceptable range. It is clear in these results that the micro-GA performed best with population size equals to 7 for this case study.

KEYWORDS: Soil-cement base, Layer moduli, Micro Genetic Algorithms

1. บทนำ

ปัญหาการขาดแคลนวัสดุหินคลุกในการก่อสร้างถนนได้ขยายตัวออกไปในหลายพื้นที่ของประเทศไทย การขนส่งหินคลุกจากระยะทางไกลทำให้ต้องเพิ่มต้นทุนการก่อสร้าง สร้างความเสียหายให้กับเส้นทางขนส่ง รวมทั้งการระเบิดหินที่กลายเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อม ทำให้การใช้วัสดุทดแทนในท้องถิ่น เช่น ดินซีเมนต์ (Soil-cement) เป็นหนึ่งในกลยุทธ์สำคัญที่จะช่วยแก้ปัญหาได้

ในช่วงเวลาที่ผ่านมามีการออกมาตรฐานเกี่ยวกับพื้นทางดินซีเมนต์ [1] และมีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับดินซีเมนต์มากยิ่งขึ้น เช่น การศึกษาเพื่อแก้ปัญหาเกี่ยวกับรอยร้าวขนาดใหญ่จากการหดตัวที่เกิดขึ้นในชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ (Major shrinkage cracks) ที่สามารถส่งผลให้เกิดเป็นรอยร้าวแบบสะท้อน (Reflective cracks) ในชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตได้ภายในระยะเวลาเพียงไม่นานภายหลังการเปิดใช้บริการ ซึ่งทำให้โครงสร้างทางมีอายุการใช้งานที่สั้นลงอย่างมาก

ทั้งนี้การแก้ปัญหารอยร้าวแบบสะท้อนด้วยการสร้างรอยร้าวขนาดเล็ก (Microcracking method) เป็นวิธีที่สะดวก และมีผลการศึกษาทั้งในและต่างประเทศ [2] ยืนยันถึงประสิทธิภาพที่ดีและที่สำคัญใช้ต้นทุนต่ำ เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้ในประเทศไทย โดยมีหัวใจสำคัญอยู่ที่การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการลดกำลังความแข็งแรงในที่ (In situ stiffness) ของชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ให้เหมาะสม ทั้งนี้จำเป็นต้องใช้วิธีการวิเคราะห์ย้อนกลับ (Back Analysis) หาค่าความ

แข็งแรงของชั้นทางดินซีเมนต์ที่มีความถูกต้องและรวดเร็ว เนื่องจากเป็นงานที่ต้องการคำตอบในภาคสนามเพื่อควบคุมการก่อสร้างให้มีประสิทธิภาพ

สำหรับระเบียบวิธีขั้นตอนเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm, GA) นั้นได้เริ่มเข้ามามีบทบาทสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการคำนวณย้อนกลับ เนื่องจากปัญหาดังกล่าวมีความซับซ้อน พื้นที่คำตอบมีหลายจุดสูงสุดและต่ำสุด (Multimodal problems) โดยเฉพาะระเบียบวิธีขั้นตอนเชิงพันธุกรรมขนาดเล็ก (micro Genetic Algorithms, μGA) ซึ่งมีคุณสมบัติหลายประการที่เหมาะสมในการนำมาประยุกต์ใช้ประเมินความแข็งแรงในที่ของชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ และชั้นทางอื่นๆ แต่กลับพบการนำ μGA มาประยุกต์ใช้ในงานลักษณะนี้น้อยมาก

งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการประยุกต์ใช้ μGA ในการวิเคราะห์ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นชั้นทาง (Layer moduli) โดยเฉพาะชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ จากค่าการยุบตัว (measured deflections) ที่วัดได้จริงในสนามจากเครื่องวัดค่าการยุบตัวจากตุ้มกระแทกแบบเบา (Lightweight Deflectometer, LWD) โดยมุ่งเป้าหาขนาดประชากรที่เหมาะสม ซึ่งจะทำให้ได้แนวทางในการประยุกต์ใช้ μGA ในการประเมินความแข็งแรงโครงสร้างถนนแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้พื้นทางดินซีเมนต์ ทั้งในขั้นตอนการก่อสร้างและช่วงเวลาเปิดให้บริการแล้ว

2. ทฤษฎีพื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ดินซีเมนต์และการพัฒนากำลัง

โครงสร้างผิวทางที่ก่อสร้างชั้นพื้นทางด้วยดินซีเมนต์และปิดทับหน้าด้วยแอสฟัลต์คอนกรีตถือเป็นโครงสร้างผิวทางชนิดหยุ่นตัว ซึ่งสามารถวิเคราะห์พฤติกรรมทางกลศาสตร์ได้โดยทฤษฎีชั้นทางยืดหยุ่น (Layered Elastic Theory, LET) โดยจำเป็นต้องทราบค่าความหนาชั้นทาง อัตราส่วนปัวซ์ซอง ค่าการยึดเกาะระหว่างชั้นทาง และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นแต่ละชั้นทางเพื่อใช้เป็นค่านำเข้าสำหรับการวิเคราะห์ค่าการยุบตัวตามทฤษฎี โดยในการทำนายค่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (ES) ของพื้นทางดินซีเมนนั้นอาจทำได้โดยใช้แบบจำลอง จากค่ากำลังอัดแกนเดียว (UCS) ซึ่งนำเสนอโดย Jaritngam et al. [3] ในปี ค.ศ. 2012 ที่พบว่าค่า UCS ของดินซีเมนต์มีการเพิ่มขึ้นในลักษณะเชิงเส้นเมื่อพล็อตเทียบกับค่าลอกการิทึมของเวลา และได้นำเสนอผลการศึกษาเป็น ไว้ดังนี้

$$ES = -71.83+188.28UCS \quad (1)$$

2.2 ระเบียบวิธีขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมขนาดเล็ก

ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1997 จนถึงปัจจุบัน ได้มีการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เช่น NUS-GABACK, GA, BACKGA, GAPAVE และ BACKGENETIC3D [4-8] ตามลำดับ ซึ่งโปรแกรมคำนวณย้อนกลับ

ทั้งหมดข้างต้นใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมอย่างง่าย (Simple Genetic Algorithm) หรือ SGA เป็นเครื่องมือค้นหาค่าคำตอบ ซึ่งขั้นตอนพื้นฐานการคำนวณย้อนกลับหาค่าโมดูลัสของถนนด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมอย่างง่าย (Simple Genetic Algorithms, SGA) สามารถสรุปได้ดังนี้

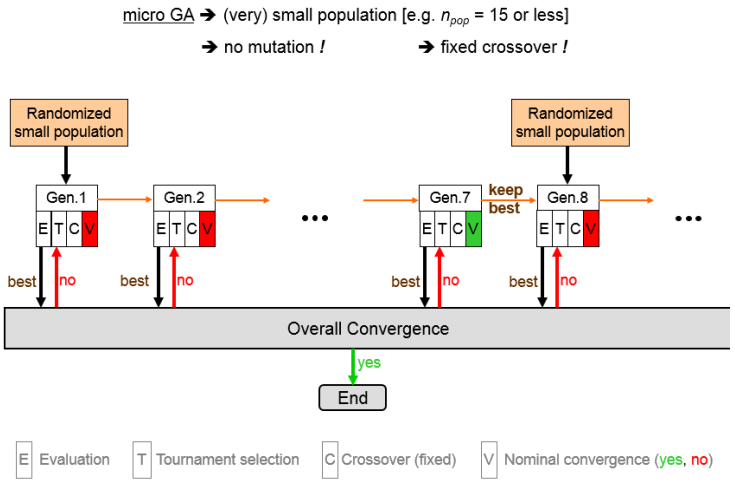
สร้างกลุ่มประชากรแบบสุ่มโดยใช้ระบบเลขฐานสอง (0,1) และแปลงรหัสกลับให้เป็นค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (ตัวแปร E_i) ของแต่ละชั้นทาง จากนั้นประเมินค่าความเหมาะสม (fitness value) โดยเปรียบเทียบค่าความยุบตัวที่คำนวณได้จาก LET กับค่าวัดจริงในสนามจากเครื่องมือ LWD โดยใช้ค่า Root Mean Square Error (*RMSE*) และเข้าสู่การผสมข้ามแบบจุดเดียว โดยโครงสร้างที่มีความเหมาะสมกว่าจะมีโอกาสถูกเลือกให้จับคู่แบบสุ่ม และผสมพันธุ์เพื่อให้กำเนิดทายาทรุ่นต่อไป จากนั้นเข้าสู่การกลายพันธ์แบบกระโดด ซึ่งรุ่นทายาทจะถูกสุ่มเลือกให้มีการเปลี่ยนค่าจาก 0 เป็น 1 หรือกลับกัน ณ ตำแหน่งสุ่มใดๆ ซึ่งมีโอกาสค่อนข้างน้อยและเพียงเพื่อช่วยให้การค้นหาคำตอบไม่ติดอยู่กับจุดต่ำสุดเฉพาะที่ใดๆ

โดยปกติประชากรรุ่นใหม่จะมีค่าความคลาดเคลื่อนที่น้อยลง และการพัฒนาประชากรจะเกิดขึ้นไปเรื่อยๆ จนกว่าจะพบโครงสร้างที่เป็นไปตามเงื่อนไข เช่น $RMSE_{\text{คำนวณได้}} < RMSE_{\text{ที่ยอมให้}}$ ซึ่งโครงสร้างนั้นจะกลายเป็นค่าชุดคำตอบที่ต้องการ ทั้งนี้จะพบว่า SGA มีศักยภาพที่ดีแต่ใช้ระยะเวลาและทรัพยากรการคำนวณค่อนข้างมาก

ในปี ค.ศ. 2005 พุทธพล ทองอินทร์ดำ [9] ได้พัฒนาโปรแกรมการคำนวณย้อนกลับชื่อ GAMLET ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งระบบ SGA [10] และ μGA ซึ่งมีกระบวนการคล้ายกับ SGA ที่อธิบายไว้ข้างต้น แต่ใช้ระยะเวลาในการคำนวณน้อยกว่า เพราะ SGA ใช้ประชากรต่อรุ่นประมาณ 50-500 แต่ μGA ใช้เพียง 15 หรือน้อยกว่า ส่งผลให้วิเคราะห์ปัญหาได้เร็วกว่าประมาณ 7 -18 เท่าตัว [9] แต่ยังคงศักยภาพการค้นหาคำตอบได้ดี ดังนั้นในกรณีการควบคุมการสร้างรอยร้าวขนาดเล็กของชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ ซึ่งเป็นกระบวนการในภาคสนามเพื่อให้ได้ข้อมูลสำคัญประกอบการตัดสินใจการเพิ่มรอบการบดอัดหรือไม่ ดังนั้น μGA จึงมีคุณสมบัติเบื้องต้นที่เหมาะสม

ในรูปที่ 1 แสดงกระบวนการของ μGA โดยประชากรเริ่มต้นจะถูกสุ่มสร้างขึ้นตามจำนวนที่กำหนด และประเมินหาค่าความเหมาะสมเช่นเดียวกับใน SGA แต่การคัดเลือกผู้มีโอกาสสืบทอดสายพันธ์ใช้วิธีทัวร์นาเมนท์ (tournament selection) [9] ซึ่งเป็นลักษณะของการสุ่มเลือกมาเปรียบเทียบหาผู้ชนะแบบตัวต่อตัว และเข้าสู่กระบวนแปลงข้ามสายพันธุ์ด้วยค่าความน่าจะเป็นแบบคงที่ และทำการตรวจสอบถึงค่าความคลาดเคลื่อนว่าอยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้เบื้องต้น (nominal convergence) หรือไม่ ประชากรที่ผลประเมินที่ดีที่สุดในแต่ละรุ่นจะถูกส่งไปตรวจสอบตามเกณฑ์ค่าความคลาดเคลื่อนโดยรวม (overall convergence) หากอยู่ในเกณฑ์ก็แสดงว่าได้ชุดคำตอบค่าโมดูลัสชั้นทางที่ต้องการ แต่หากเกินกว่าเกณฑ์ กระบวนการของรุ่นที่ 2 และรุ่นต่อไปจะเริ่มต้นขึ้นในลักษณะเดิม จนถึงจำนวนรุ่นที่กำหนด เช่นในรุ่นที่ 8 ที่แสดงในรูปที่ 1 จะมีการคัดทิ้งประชากร

ทั้งหมด ยกเว้นประชากรที่ดีที่สุดเพียง 1 เดียว และทำการสุ่มสร้างประชากรชุดใหม่แทนชุดเก่าที่คัดทิ้งไป จากนั้นก็เริ่มขั้นตอนในรุ่นต่อไปในลักษณะเดิมจนกว่าจะพบชุดคำตอบที่ต้องการ



รูปที่ 1 กระบวนการของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมขนาดเล็ก

โดยในปี ค.ศ. 1999 Abu-Lebdeh และ Benekohal [11] ได้ศึกษาความแปรผันของการลู่เข้าและขนาดประชากรที่เหมาะสมของ μGA และพบว่าจำนวนประชากรที่ดีที่สุดไม่สามารถหาค่าได้หากยังไม่มีข้อมูลการลู่เข้า และการลู่เข้านั้นอาจไม่มุ่งสู่คำตอบที่ดีที่สุด โดยในการศึกษาครั้งนั้นได้แบ่งระดับของการคำนวณไว้ 3 ระดับ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ระดับการคำนวณของ μGA [11]

ระดับการคำนวณ	จำนวนครั้งการคำนวณฟังก์ชัน
จำกัด (limited)	5,000 ครั้ง
ปานกลาง (medium)	10,000 ครั้ง
เปิดกว้าง (generous)	30,000 ครั้ง

โดยพบว่าในกรณีการคำนวณแบบเปิดกว้างนั้นจำนวนประชากรขนาดเล็กสามารถทำงานได้ดีเทียบเท่าหรือในบางครั้งดีกว่าจำนวนประชากรขนาดใหญ่ ทั้งนี้ Abu-Lebdeh และ Benekohal [11] ได้นำเสนอวิธีการหาค่าจำนวนประชากรที่ดีที่สุดกับแต่ละโจทย์ปัญหาของ micro-GA ไว้ 3 วิธีการ ได้แก่ วิธีสุ่มเลือกประชากร (Random Choice of Population) วิธีรายละเอียด (The Detailed Approach) และ วิธีอย่างง่าย (The Simplified Approach)

โดยจากทั้ง 3 วิธี พบว่าวิธีอย่างง่ายเป็นวิธีที่สะดวกเหมาะกับการใช้งานในทางปฏิบัติ จึงเป็นวิธีที่จะนำมาใช้ทดสอบหาค่าจำนวนประชากรที่ดีที่สุดในงานวิจัยนี้ โดยมีขั้นตอน ดังนี้คือ

1) กำหนดช่วงของจำนวนประชากรโดยประมาณจากค่าระหว่าง $0.4(L)^{1/2}$ ถึง $1.4(L)^{1/2}$ โดยที่ L คือ ความยาวของสายอักขระ (String length)

2) เริ่มต้นคำนวณโดยใช้ค่าจำนวนประชากรโดยประมาณ $(L)^{1/2}$ โดยทดสอบทั้ง 3 ระดับการคำนวณ ในกรณีกำหนดสถานะแบบจำกัดให้เลือกทดสอบที่ด้านบนของช่วง แต่หากกำหนดสถานะแบบเปิดกว้างให้เลือกทดสอบที่ด้านล่างของช่วง

3. ขั้นตอนวิธีวิจัย

1. พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ GAMLET ให้สามารถวิเคราะห์โครงสร้างชั้นทางดินซีเมนต์แบบเดินหน้าด้วย LET และใช้ μGA เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ย้อนกลับ

2. เลือกวัสดุดินลูกรังสำหรับก่อสร้างดินซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ มาตรฐานกรมทางหลวงที่ ทล.-ม. 204/2556 [1]

3. กำหนดบริเวณก่อสร้างแปลงทดสอบและอยู่ในบริเวณที่มีความสะดวกในการเฝ้าสังเกตและบันทึกข้อมูลการพัฒนาของรอยร้าวทั้งในช่วงเวลาต่างๆ

4. สร้างแปลงทดสอบ 2 แปลง ขนาดความกว้าง 3 เมตร ความยาว 10 เมตร ตามมาตรฐานการก่อสร้างของกรมทางหลวง โดยเลือกใช้รถบดล้อเหล็กขนาด 19 ตัน ดังแสดงในรูปที่ 2

รูปที่ 2 ลักษณะของรถบดล้อเหล็กที่ใช้ในโครงการวิจัยนี้ น้ำหนัก 19 ตัน

5. ผสมดินกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 ร้อยละ 8 โดยน้ำหนักเทียบกับน้ำหนักดินแห้ง ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างสูงกว่าค่ามาตรฐานทั่วไป เนื่องจากต้องการให้มีรอยร้าวที่ชัดเจนในชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ของแปลงทดสอบ เพื่อความสะดวกต่อการติดตามพฤติกรรมรอยร้าวด้วยตาเปล่า

6. ปูชั้นพื้นทางดินซีเมนต์หนา 15 เซนติเมตร ทั้ง 2 แปลงทดสอบ และทำการบ่มเปียกด้วยการฉีดพ่นน้ำ 3 วัน โดยไม่มีการลาดแอสฟัลต์ชั้น Prime coat ปิดทับ และกำหนดให้แปลงที่ 1 เป็นแปลงทดสอบ และแปลงที่ 2 เป็นแปลงควบคุม

7. ที่อายุ 3 วัน และ 7 วัน ตรวจสอบรอยร้าวและสภาพความเสียหายทั่วไป รวมทั้งเจาะเก็บตัวอย่างดินซีเมนต์จากทั้ง 2 แปลงทดสอบ เพื่อหาค่า UCS

8. ใช้ผลทดสอบ UCS ที่ได้จากขั้นตอนที่ 9 วิเคราะห์หาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ โดยใช้แบบจำลองจากผลการศึกษาของ Jaritngam et al. [3]

9. ใช้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุ 28 วัน จากขั้นตอนที่ 10 สร้างแบบจำลองโครงสร้างทางในโปรแกรมวิเคราะห์ชั้นทางยืดหยุ่น BISAR ซึ่งต้องมีค่าตัวแปรพื้นฐานของชั้นทาง ได้แก่ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ค่าความหนา และอัตราส่วนปัวซ์ซอง เป็นต้น

10. วิเคราะห์หาค่าการยุบตัวตามแนวรัศมีในโปรแกรมวิเคราะห์ชั้นทางยืดหยุ่น BISAR เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลในประเมินประสิทธิภาพของการวิเคราะห์ย้อนกลับ

11. ใช้ผลวิเคราะห์จากโปรแกรม BISAR เป็นข้อมูลพื้นฐานในการเปรียบเทียบความสามารถในการวิเคราะห์ย้อนกลับของโปรแกรม GAMLET ที่ใช้ μGA

12. วิเคราะห์หาค่าจำนวนประชากรที่ดีที่สุด (best population size) สำหรับ μGA ด้วยวิธีอย่างง่าย และประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างแอสฟัลต์ที่ใช้พื้นทางดินซีเมนต์

ทั้งนี้การวิเคราะห์การปฏิบัติงานในภาคในสนามต้องการได้คำตอบที่รวดเร็ว ดังนั้นในการศึกษานี้จะทำการวิเคราะห์ในระดับเปิดกว้างเพื่อดูในภาพรวมเท่านั้น และจะมุ่งประเด็นที่การทดสอบในระดับจำกัด (limited) หรือ 5,000 ครั้ง เป็นหลัก ส่วนค่านำเข้าอื่นแสดงไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าตัวแปรของ μGA สำหรับวิเคราะห์

ตัวแปร (variable)	ค่านำเข้า
ค่า E_{min}–E_{max} ชั้นทางที่ 1 [MPa]	500-8,000
ค่า E_{min}–E_{max} ชั้นทางที่ 2 [MPa]	5-1,000
ค่า E_{min}–E_{max} ชั้นทางที่ 3 [MPa]	5-500
จำนวนรุ่นสูงสุด	varies
จำนวนประชากร	varies
อัตราการผสมข้ามแบบจุดเดียว	0.50
การปิด-เปิด การผสมข้ามแบบสม่ำเสมอ	on
การคงอยู่ของผู้นำ	on
จำนวนทายาทต่อหนึ่งคู่	1

4. ผลการทดสอบและบทวิเคราะห์

4.1 ผลการคาดการณ์ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นดินซีเมนต์

จากผลศึกษาของ Jaritngam et al. [3] ได้ค่าคาดการณ์ค่า UCS ของดินซีเมนต์แบบเชิงเส้นเทียบกับ log ของเวลา ทำให้ประเมินค่าโมดูลัสยืดหยุ่นดินซีเมนต์ที่อายุ 28 วันได้ 666 MPa จึงสร้างแบบจำลองโครงสร้างถนนได้ดังตารางที่ 3 และใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ BISAR วิเคราะห์ภายใต้น้ำหนักกระทำ 0.7 MPa ตามแนวรัศมี ที่ระยะ 0, 200, 300, 450, 600, 900, 1200, และ 1500 มม. ได้ค่ายุบตัวเท่ากับ 828, 708, 630, 530, 446, 319, 236 และ 181 ไมครอน ตามลำดับ

ตารางที่ 3 แบบจำลองโครงสร้างถนน-พื้นทางดินซีเมนต์ ที่อายุ 28 วัน

Layer	Thickness [m]	Material	E [MPa]	μ	Slip behavior
1	0.10	HMA	3,000	0.35	0.00
2	0.15	Soil cement	666	0.20	0.00
3	Inf.	Subgrade	20	0.40	

จากช่วงความเป็นไปได้ของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของแต่ละชั้นทางทำให้ได้ความยาวข้อมูล (String length, L) ของเลขฐาน 2 (Binary code) ได้ 32 ทำให้กำหนดช่วงจำนวนประชากรได้ระหว่าง 0.4(L)1/2 ถึง 1.4(L)1/2 คือ 2 ถึง 8 แต่เนื่องจากค่าจำนวนประชากร 3 เป็นค่าต่ำสุดที่แนะนำ [11] ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงกำหนดค่าตัวแปรของช่วงจำนวนประชากรที่ดีที่สุด คือ 3 ถึง 8 โดยค่า (L)1/2 ซึ่งเท่ากับ 6 คือ ค่าจำนวนประชากรต่อรุ่นที่แนะนำให้ใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการวิเคราะห์

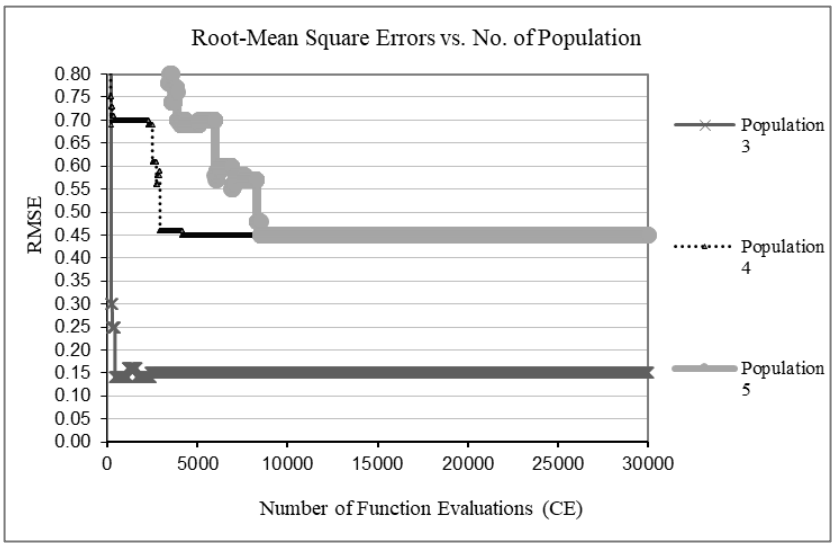
4.2 ผลการวิเคราะห์ระดับเปิดกว้าง

พิจารณาความคลาดเคลื่อนของคำตอบในรูปของค่า RMSE จากการเปรียบเทียบค่าการยุบตัวตั้งต้นกับค่าการยุบตัวที่ได้จากชุดโมดูลัสยืดหยุ่นชั้นทาง (E_1, E_2, E_3) จากการคำนวณย้อนกลับดังแสดงในรูปที่ 3 และรูปที่ 4 ซึ่งพบว่าจำนวนประชากร 7 และ 8 ได้ชุดคำตอบสุดท้ายที่ใกล้เคียงกัน โดยจำนวนประชากร 7 ให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด เท่ากับ 0.02 เท่านั้น โดยให้ค่าคำตอบของโมดูลัสยืดหยุ่นชั้นทาง ดังนี้

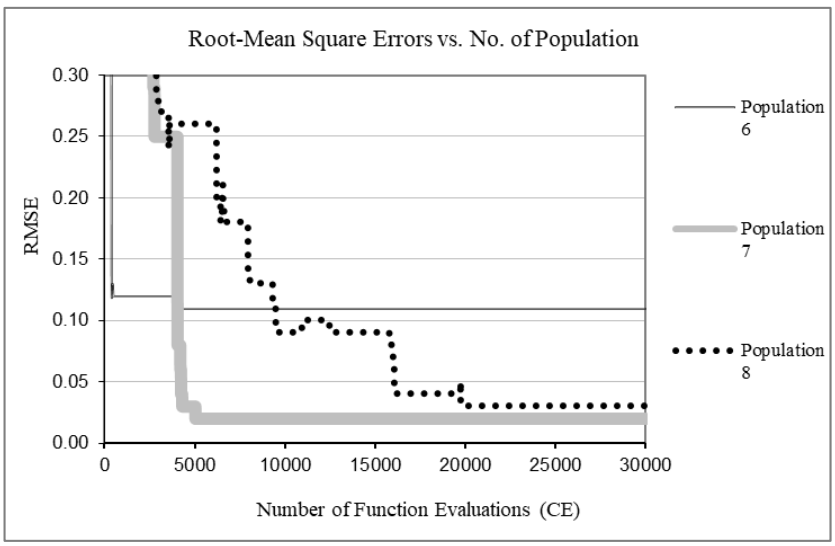
ผลวิเคราะห์: E1 = 3,002, E2 = 666 และ E3 = 50 [MPa]

คำตอบแท้จริง: E1 = 3,000, E2 = 666 และ E3 = 50 [MPa]

ทำให้สรุปได้ว่าผลวิเคราะห์มีความถูกต้องแม่นยำในเกณฑ์สูง มีเพียงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของแอสฟัลต์คอนกรีตคลาดเคลื่อนไปเพียง 2 MPa ซึ่งไม่มีผลกระทบในการนำไปใช้งานออกแบบเลย โดยมีข้อสังเกตเพิ่มเติมว่าการลู่เข้าของค่าคำตอบยุติโดยประมาณที่ ค่า Function Evaluations = 20,000 แสดงว่าการทำงานหลังจากนั้นไม่เกิดประโยชน์เพิ่มเติม



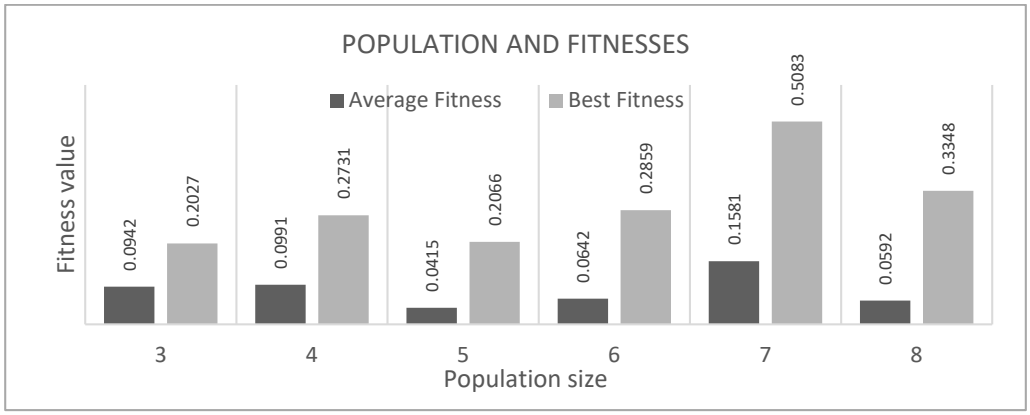
รูปที่ 3 ค่าความคลาดเคลื่อนของกรณีประชากรเริ่มต้นเท่ากับ 3, 4 และ 5



รูปที่ 4 ค่าความคลาดเคลื่อนของกรณีประชากรเริ่มต้นเท่ากับ 6, 7 และ 8

4.3 ผลการวิเคราะห์ระดับ Limited

การวิเคราะห์ทั้งหมดในงานวิจัยนี้ เปิดใช้งานฟังก์ชัน Elitism ซึ่งเก็บชุดคำตอบโมดูลัสยืดหยุ่นที่ดีที่สุดไว้ตลอดเวลาและส่งต่อสู่รุ่นถัดไปโดยอัตโนมัติ ดังนั้นชุดคำตอบในรุ่นสุดท้ายจึงเป็นชุดคำตอบที่ดีที่สุดของการวิเคราะห์นั้นเสมอ โดยการนำชุดคำตอบที่ดีที่สุดของรุ่นสุดท้ายจากการวิเคราะห์ทั้งหมดจำนวน 10 ครั้ง และหาค่าเฉลี่ย ทำให้ได้ผลค่าเฉลี่ยของ Average Fitness และ Best Fitness ดังรูปที่ 5 ซึ่งพบว่าจำนวนประชากร=7 ยังคงมีประสิทธิภาพสูงสุด สอดคล้องกับผลวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนที่แสดงในรูปที่ 6 ที่จำนวนประชากร=7 มีค่า RMSE โดยเฉลี่ยต่ำที่สุด คือ 0.10 นอกจากนั้นยังมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานเพียง 0.13 ซึ่งก็เป็นค่าที่ต่ำที่สุดอีกด้วย จึงสรุปได้อย่างชัดเจนว่าจำนวนประชากร=7 คือค่าที่ดีที่สุดในการใช้วิเคราะห์ประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างถนนที่ใช้พื้นทางดินซีเมนต์



รูปที่ 5 ค่า Fitness โดยเฉลี่ยและที่ดีที่สุดแยกตามขนาดจำนวนประชากร

รูปที่ 6 ค่า RMSE และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน แยกตามขนาดจำนวนประชากร

โดยตารางที่ 4 แสดงค่าเฉลี่ยทั้งหมดจากการวิเคราะห์จำนวน 10 รอบ พบว่าชุดคำตอบของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นชั้นทางมีความคลาดเคลื่อนจากคำตอบที่แท้จริงมากกว่า การวิเคราะห์ระดับเปิดกว้างแต่ยังคงแสดงแนวโน้มที่ชัดเจนของความถูกต้อง และมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์ที่ดี

ตารางที่ 4 ค่าเฉลี่ยของผลวิเคราะห์จาก 10 ชุดที่ต่างกัน

No. of Pop.	Gen	Evaluation Function	Average Fitness	Best Fitness	Max. Error	RMSE	Standard Deviation	E1	E2	E3
3	1667	5001	0.0942	0.2027	-0.57	0.52	0.64	3471	634	50
4	1250	5000	0.0991	0.2731	0.36	0.36	0.49	3579	576	52
5	1000	5000	0.0415	0.2066	0.01	0.23	0.20	3942	581	68
6	834	5004	0.0642	0.2859	-0.43	0.33	0.49	3632	678	107
7	715	5005	0.1581	0.5083	-0.08	0.10	0.13	3488	644	121
8	625	5000	0.0592	0.3348	-0.66	0.47	0.64	3628	600	75

จากผลการวิเคราะห์ที่ดีที่สุดระดับจำกัด เมื่อใช้จำนวนประชากร 7 พบว่า ถึงแม้ว่าค่า RMSE จะมีค่าเท่ากับ 0.02 ซึ่งเท่ากับกรณีการวิเคราะห์ระดับเปิดกว้าง แต่เห็นได้ชัดว่าค่าโมดูลัสคำตอบของชั้นแอสฟัลต์คอนกรีต (E_1) มีความคลาดเคลื่อนมากกว่าเล็กน้อย คือ 75 MPa ทั้งนี้น่าจะมีสาเหตุจากระบบการปัดเศษค่า RMSE ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนของทั้ง 2 ชุดคำตอบมีค่าเท่ากัน

5. สรุปผล

จากผลการศึกษาทั้งหมดสามารถสรุปสาระสำคัญได้ดังนี้

วัสดุหลักที่ใช้ในโครงการวิจัยนี้โดยเฉพาะดินลูกรัง มีคุณสมบัติผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง โดยค่า UCS ของดินซีเมนต์ที่อายุ 3 และ 7 วัน พัฒนากำลังเพิ่มขึ้นจึงใช้แบบจำลองคาดการณ์ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเพื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีชั้นทางยืดหยุ่นได้

การวิเคราะห์โครงสร้างที่ระดับเปิดกว้างแสดงว่าจำนวนประชากรขนาดเล็กมีประสิทธิภาพต่ำกว่าขนาดใหญ่กว่า ทั้งนี้จำนวนประชากรเท่ากับ 7 ให้คำตอบที่มีความถูกต้องสูงสุด แต่การวิเคราะห์ประมาณ 10,000 ครั้งสุดท้ายกลายเป็นข้อด้อยที่ใช้ระยะเวลานานขึ้น ในขณะที่การวิเคราะห์ที่ระดับจำกัดทำให้ได้คำตอบเร็วขึ้น 6 เท่าโดยประมาณ โดยจำนวนประชากรเท่ากับ 7 ยังคงให้คำตอบที่มีความถูกต้องสูงสุดด้วยค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำที่สุดอีกด้วย จึงสรุปได้ว่าเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกรณีศึกษานี้

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ที่อนุมัติงบประมาณแผ่นดินประจำปี พ.ศ. 2560 ขอขอบคุณทีมงานศูนย์ความเป็นเลิศด้านโครงสร้างพื้นฐานและเทคโนโลยีท่าอากาศยาน (Center of Excellence for Infrastructure and Airport Technology) ที่ทำงานอย่างจริงจัง และขอขอบคุณหน่วยงานท้องถิ่นในจังหวัดฉะเชิงเทราที่อำนวยความสะดวกในการใช้สถานที่ ทำให้สามารถดำเนินงานวิจัยนี้ได้อย่างต่อเนื่องและเสร็จสมบูรณ์

References

[1] Department of Highways Thailand. Standard No. DH-S. 204/2556 Soil cement base. Road Standards; 2013. (In Thai)

[2] Suntisakul J, et al. Microcracks to reduce reflective crack in soil cement road in Thailand. Department of Highway Thailand; 2007. (In Thai)

[3] Jaritngam S. et al. Development of strength model of Lateritic soil-cement. Engineering Journal 2012;17(1):69-77.

[4] Fwa TW, Rani TS. Seed modulus generation algorithm for backcalculation of flexible pavement moduli. Transportation Research Record 2005;1905:117-27.

[5] Kameyama S, et al. Backcalculation of pavement layer moduli using genetic algorithms. Eighth International Conference on Asphalt Pavements; 1997 Aug 10-14; Seattle, Washington. 1998. p.1375-85.

[6] Reddy MA, Murthy MS, Reddy KS, Pandey BB. Backcalculation of pavement layer moduli using genetic algorithms. Journal of Highway Research Board 2002:66;1-10.

[7] Park HM; Park SW, Hwang JJ. Use of genetic algorithm and finite element method for backcalculating layer moduli in asphalt pavements. Transportation Research Record 2006; Report No. 07-2614.

[8] Alkasawneh W. Backcalculation of pavement moduli using genetic algorithms [Dissertation]. Akron: The University of Akron; 2007.

[9] Thongindam P. Enhancement of backcalculation techniques for assessing flexible pavement layer moduli using genetic algorithms [Dissertation]. Hannover: Gottfried Wilhelm Leibniz University of Hannover; 2009.

[10] Thongindam P. Integrated pavement engineering for evaluation of Thai asphalt roads by the way of Life. Engineering Journal Siam University 2013;14(1):43-56 (In Thai)

[11] Abu-Lebdeh G, Benekohal R. Convergence variability and population sizing in micro-genetic algorithms. Computer-Aided Civil Engineering and Infrastructure Engineering 1999;14:321-34.

ประวัติผู้เขียนบทความ

พุทธพล ทองอินทร์ดำ ผู้ช่วยคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ และ หัวหน้าศูนย์ความเป็นเลิศด้านโครงสร้างพื้นฐานและเทคโนโลยีท่าอากาศยาน ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์สาขาวิศวกรรมขนส่ง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี โทรศัพท์ 02-549-4446, E-mail: puttapon.t@en.rmutt.ac.th

ประกาศ ทองประไพ กรรมการบริหารศูนย์ความเป็นเลิศด้านโครงสร้างพื้นฐานและเทคโนโลยีท่าอากาศยาน ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมโครงสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีธัญบุรี หมายเลขโทรศัพท์ 0-2549-3410, E-mail: prakard.t@en.rmutt.ac.th